

AVANT PROJET DE PRODUIT INDUSTRIEL

Sous épreuve U41 - Etudes et calculs d'avant-projet

Durée : 3 h 30

Microcar Virgo



AUCUN DOCUMENT AUTORISÉ

Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique, à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante, sont autorisées.

Documents remis au candidat

Dossier TECHNIQUE

- | | |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| - Présentation et documents constructeur de la voiture Microcar Virgo | pages 2 à 5 |
| - Dessin d'ensemble du moyeu avant et de la pince de freinage | document technique 1 |

Dossier TRAVAIL DEMANDE

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| - Modélisation cinématique d'un demi train avant | page 2 |
| - Caractérisation des efforts de freinage et vérification des composants | pages 2 et 3 |
| - Dimensionnement des vis de fixation de pince de frein | page 4 |
| - Résistance du moyeu disque | pages 5 à 7 |

Dossier RESSOURCE

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| - Couples de serrage et efforts de traction recommandés pour boulons normalisés profil I.S.O. | page 2 |
| - Résultats du calcul par éléments finis | page 3 |

Dossier REPONSE

- | | |
|---------------------------------------------------|--------------------|
| - Schéma cinématique du demi train avant | document réponse 1 |
| - Calcul du couple de freinage | document réponse 2 |
| - Répartition du freinage | document réponse 3 |
| - Effort sur la pédale de frein | document réponse 4 |
| - Résistance du moyeu disque en phase motrice | document réponse 5 |
| - Résistance du moyeu disque en phase de freinage | document réponse 6 |

Documents à rendre par le candidat : tous les DOCUMENTS REPONSE

Temps conseillé pour traiter chaque partie du sujet :

<i>Lecture du sujet</i>	<i>15 mn</i>
<i>1^{ère} partie</i>	<i>20 mn</i>
<i>2^{ème} partie</i>	<i>1 h 30 mn</i>
<i>3^{ème} partie</i>	<i>25 mn</i>
<i>4^{ème} partie</i>	<i>1 h</i>

DOSSIER TECHNIQUE

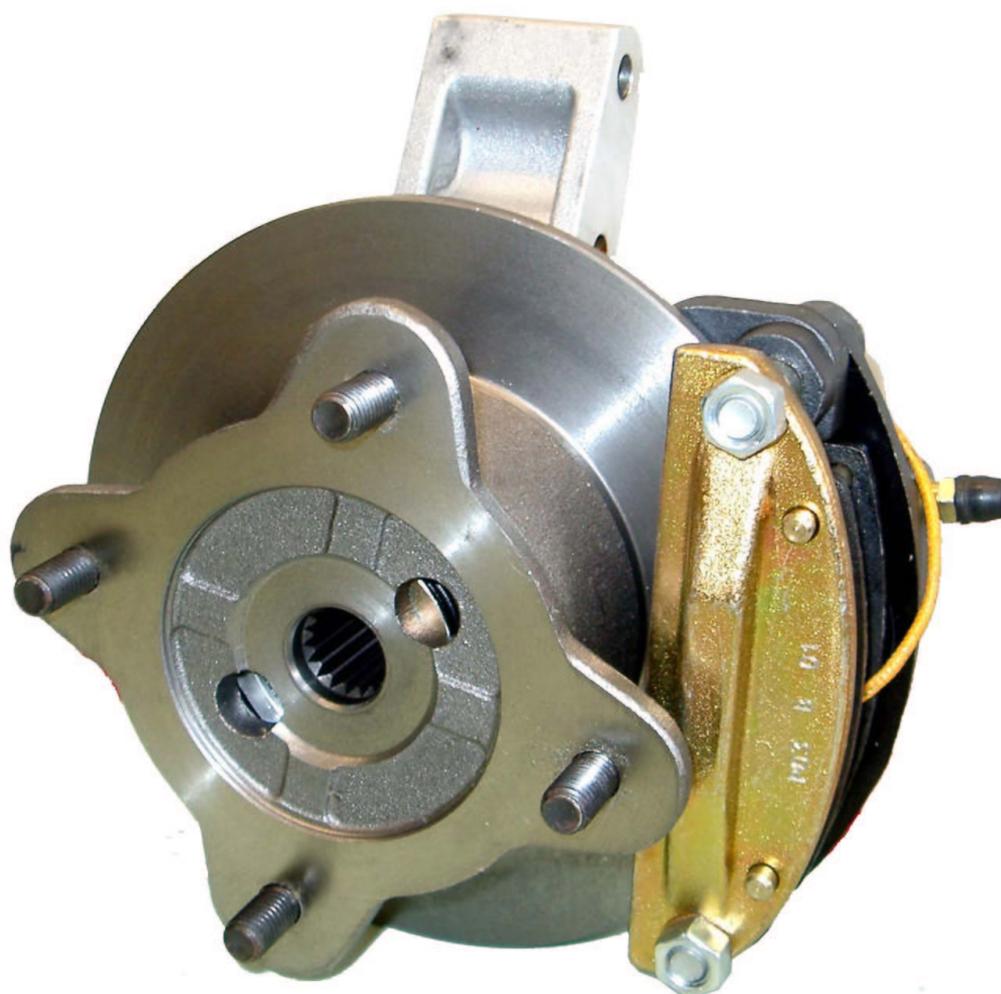
Ce dossier comporte :

- Présentation et documents constructeur
de la voiture *Microcar Virgo*

pages 2 à 5

- Dessin d'ensemble du moyeu avant assemblé

Document technique 1
format A2



Sous – épreuve U 41

Microcar Virgo

1- PRÉSENTATION

La Virgo est une voiture sans permis dont la vitesse et la puissance motrice sont limitées. La carrosserie autoporteuse est en composite polyester - fibres de verre. Elle dispose de freins à disque à l'avant et



de freins à tambour à l'arrière. Elle se décline en deux types de motorisation et quatre niveaux de finition.

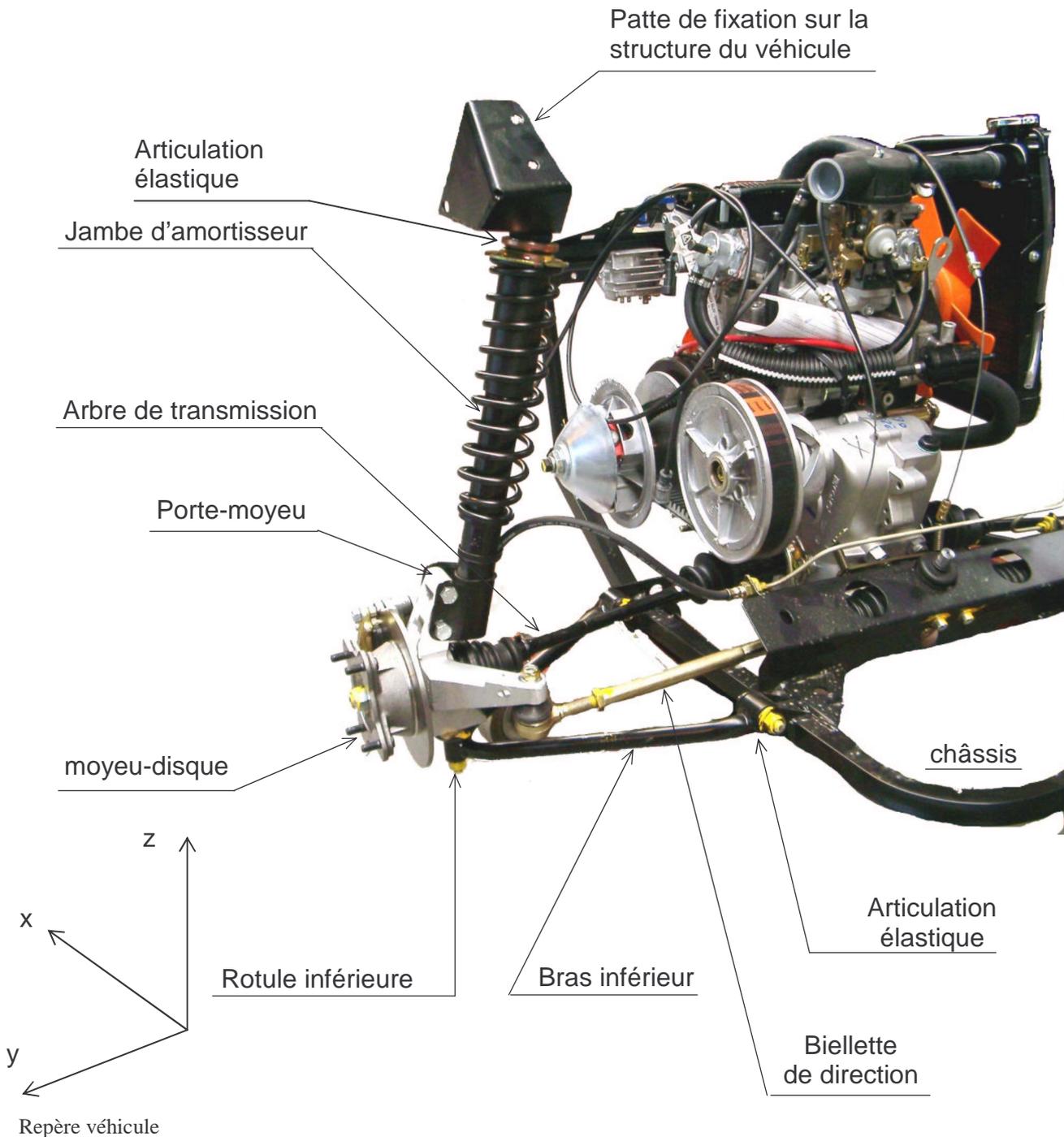
2- PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA VERSION ÉTUDIÉE

Moteur	Lombardini / diesel / 4 temps
Refroidissement	liquide
Cylindrée	505 cm ³
Injection	Indirecte
Puissance maximale	4 kW
Couple maximal	15 Nm à 2400 tours / min
Régime maximal en charge	3200 tours / min
Alternateur extérieur	500 W
Transmission	Traction avant, variateur automatique, boîte inverseur, transmission homocinétique à billes
Longueur / largeur / hauteur	2580 / 1375 / 1390
Empattement	1720
Voies avant / arrière	1190 / 1200
Masse à vide / masse totale en charge	350 kg / 620 kg
Pneumatique	Michelin Proxima 145 / 60 R 13 65 S
Consommation	3 à 3,5 litres pour 100 km
Volume du réservoir	18 litres
Direction	A crémaillère
Rayon de braquage	4,1 m
Freins	Avant : disque Ø 172 mm Arrière : tambours Ø 160 mm
Volume du coffre	900 litres

3 – ESSIEU AVANT

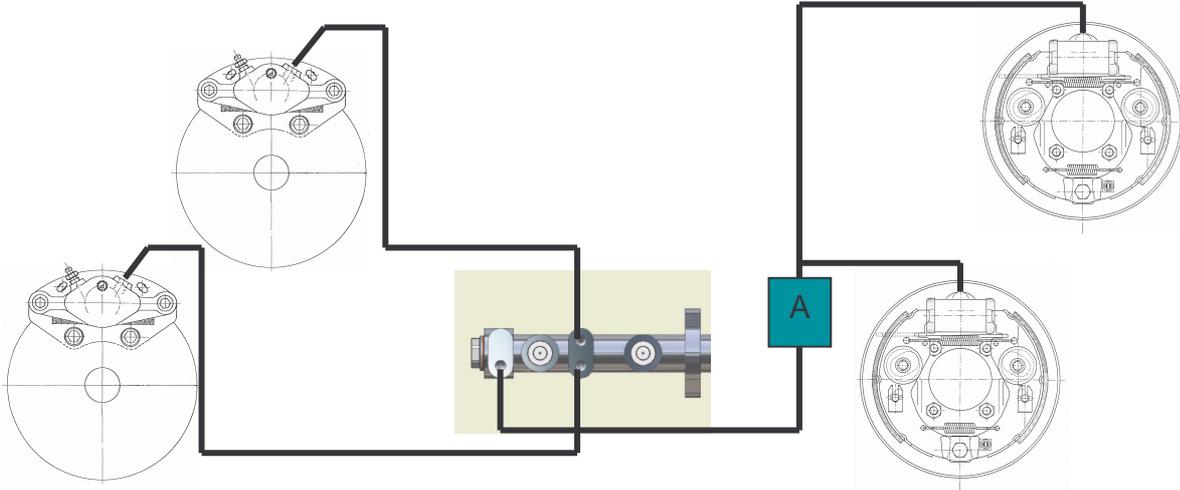
Chaque demi - train avant (droit et gauche) du véhicule comporte :

- une roue liée au moyeu–disque de frein,
- un porte moyeu servant à guider le moyeu,
- une jambe d’amortisseur liée au porte moyeu (dans sa partie inférieure), et à la structure du véhicule (en partie supérieure),
- un bras inférieur triangulé, en liaison rotule avec le porte moyeu, et articulé sur le châssis,
- un arbre de transmission à joints homocinétiques.

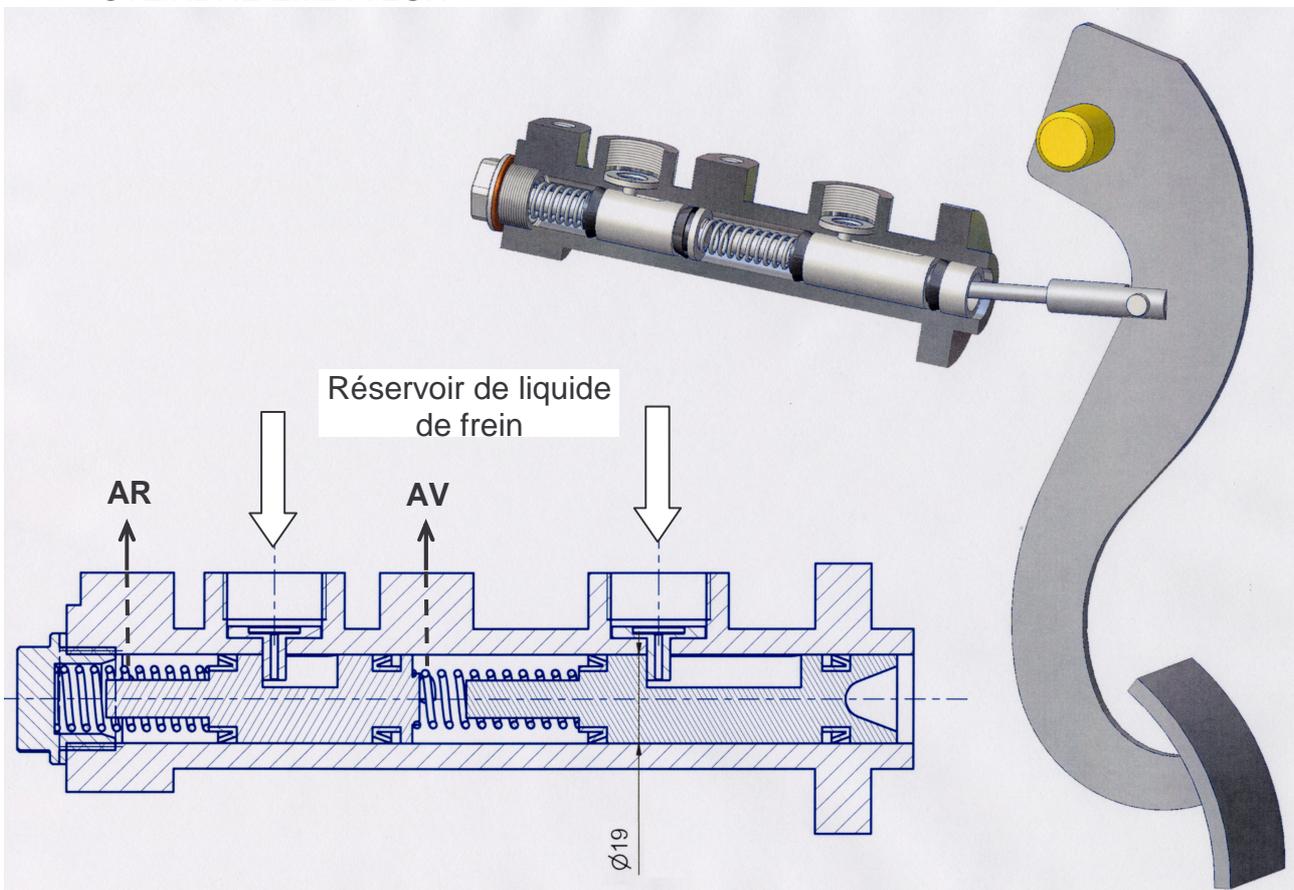


4 – SCHEMA DU CIRCUIT DE FREINAGE :

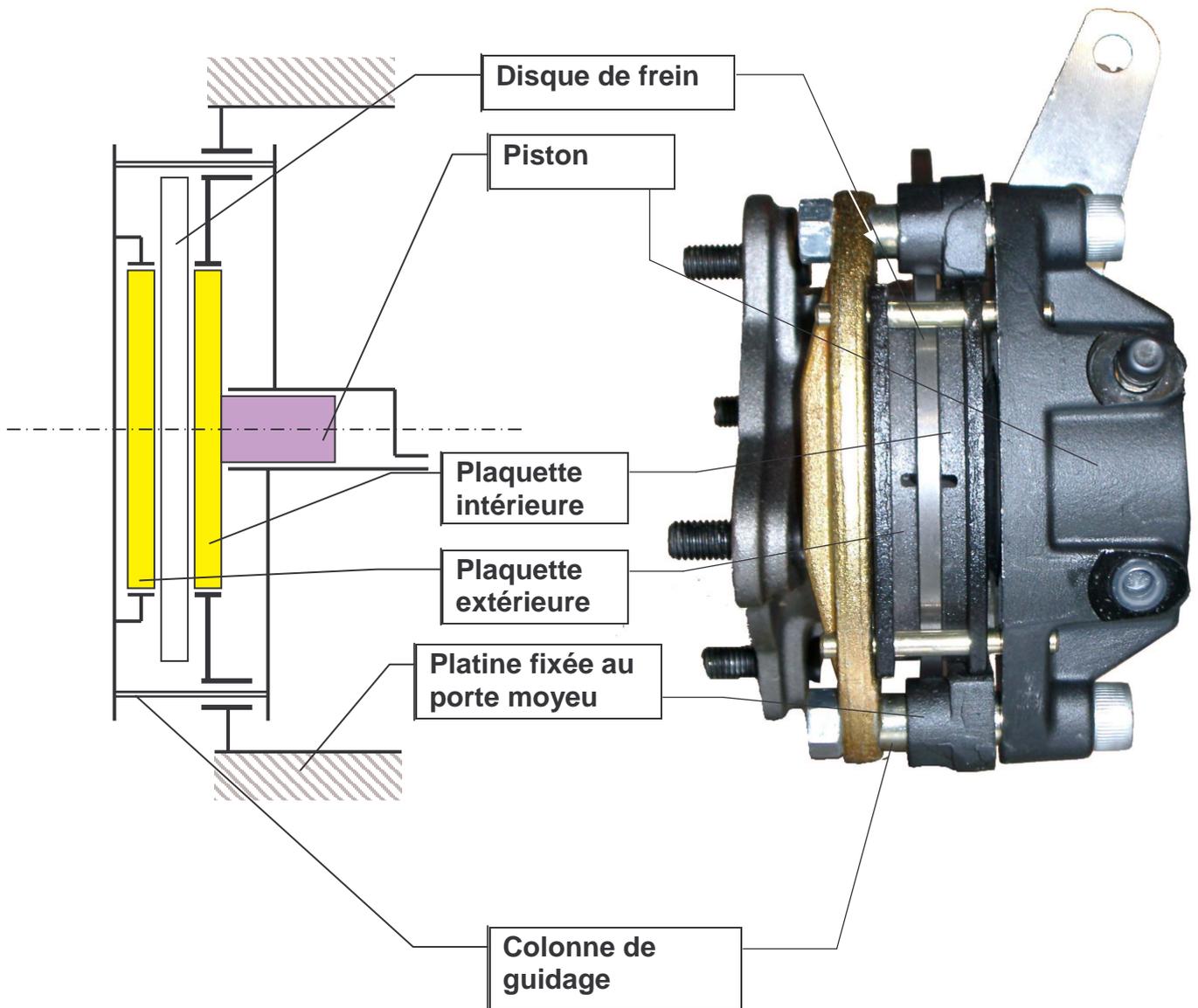
Le circuit de freinage est constitué d'un cylindre émetteur actionné par la pédale de frein, qui alimente en huile sous pression les freins à disque avant et les freins à tambour arrière.



CYLINDRE ÉMETTEUR



5 – SCHÉMA TECHNOLOGIQUE DE LA PINCE DE FREIN



DOSSIER TRAVAIL DEMANDE

Ce dossier comporte les parties suivantes :

- 1^{ère} **Partie** : MODELISATION CINEMATIQUE D'UN DEMI-TRAIN AVANT page 2
- 2^{ème} **Partie** : CARACTÉRISATION DES EFFORTS DE FREINAGE ET
VÉRIFICATION DES COMPOSANTS pages 2 et 3
- 3^{ème} **Partie** : DIMENSIONNEMENT DES VIS DE FIXATION DE PINCE
DE FREIN page 4
- 4^{ème} **Partie** : RESISTANCE DU MOYEU-DISQUE pages 5 à 7

Sous – épreuve U 41

1^{ère} Partie : MODELISATION CINEMATIQUE D'UN DEMI-TRAIN AVANT

OBJECTIF : Préparer une modélisation sur logiciel afin de connaître les débattements de suspension.

Références : - Dossier technique
- **Document réponse 1**

TRAVAIL DEMANDE :

- 1- A l'aide de la photo de l'essieu avant (dossier technique page 3), réaliser sur le **document réponse 1** le schéma cinématique du demi-train avant équipé de son arbre de transmission et de sa biellette de direction.

2^{ème} Partie : CARACTÉRISATION DES EFFORTS DE FREINAGE ET VERIFICATION DES COMPOSANTS

OBJECTIF : Vérifier l'effort maximal sur la pédale de frein afin de savoir si une assistance au freinage est nécessaire.

Données :

- Vitesse initiale du véhicule :	$v = 45 \text{ km/h}$
- Distance de freinage :	$e = 8,5 \text{ m}$
- Masse du véhicule (avec conducteur) :	$m = 420 \text{ kg}$
- Diamètre des roues :	$d_r = 504 \text{ mm}$
- Rayon moyen de la zone de contact plaquette/disque :	$r_m = 72,5 \text{ mm}$
- Facteur de frottement plaquette/disque :	$\mu = 0,35$
- Diamètre du piston pince avant	$d = 42 \text{ mm}$

Hypothèses :

- Les frottements dans les guidages sont négligés ; seuls l'adhérence roue/sol et le frottement plaquette/disque sont pris en compte.
- Le véhicule se déplace en ligne droite sur une route horizontale pendant la phase de freinage.
- L'inertie des pièces tournantes est négligée.
- Le problème présente une symétrie par rapport au plan médian (G, \vec{x}, \vec{z})

Références : - Dossier technique
- **Documents réponse 2, 3 et 4**

2-1 : Détermination de la pression dans le circuit hydraulique.

Dans une première approche on suppose qu'il n'y a pas de glissement entre les roues et le sol.

- 2-1-1** Sur le **document réponse 2**, à l'aide d'un calcul énergétique approché par des hypothèses que vous énoncerez, déterminer la somme des couples de freinage des 4 roues nécessaires pour immobiliser le véhicule sur une distance de 8,5 m.
- 2-1-2** Sur le **document réponse 3**, pour affiner le résultat de la question précédente, et afin de préparer un calcul informatique :
- 2-1-2-1 Ecrire le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble "VIRGO".
- 2-1-2-2 Placer sur le schéma du **document réponse 3** les actions mécaniques en cause ainsi que le vecteur accélération du centre de gravité.
- 2-1-2-3 Le résultat du calcul donne les valeurs suivantes :
Résultante de l'action mécanique du sol sur une roue avant (droite ou gauche) :
$$\overrightarrow{R(sol \rightarrow Roue_{AV})} = -1640 \vec{x} + 1760 \vec{z} \quad \text{en N.}$$

Résultante de l'action mécanique du sol sur une roue arrière (droite ou gauche) :
$$\overrightarrow{R(sol \rightarrow Roue_{AR})} = -290 \vec{x} + 310 \vec{z} \quad \text{en N.}$$

En déduire la répartition en % du freinage sur les roues avant et les roues arrières.
- 2-1-3** Calculer sur feuille de copie la composante tangentielle de l'effort exercé **par chaque plaquette** sur un disque avant. En déduire la composante normale.
Voir le schéma de la pince de frein dans le dossier technique page 5.
- 2-1-4** Déterminer la pression d'alimentation de la pince nécessaire pour produire cet effort presseur.

2-2 : Vérification de l'effort maximal sur la pédale de frein.

- 2-2-1** Pour cette partie on supposera que la pression dans le circuit avant est de $p_1 = 70$ bars (soit 7 MPa). Quelle est alors la pression p_2 dans la partie du cylindre émetteur alimentant le circuit arrière ? Poser les hypothèses simplificatrices nécessaires à la résolution.
Voir le schéma du circuit de freinage et dessin du maître cylindre dans le dossier technique page 4.
- 2-2-2** Pour développer un couple de freinage de 73,5 N.m sur chaque roue arrière la pression d'alimentation du frein arrière à tambour doit être de 12 bars. Quelle est la fonction du **composant A** repéré sur le schéma du circuit de freinage (*dossier technique page 4*). Quel nom peut-on lui donner ?
- 2-2-3** Sur le **document réponse 4** déterminer l'effort que doit exercer le conducteur sur la pédale dans les conditions de freinage précédentes. (Résolution graphique sur **document réponse 4** en supposant les liaisons parfaites). Énoncer les hypothèses nécessaires à la résolution.

3^{ème} Partie : DIMENSIONNEMENT DES VIS DE FIXATION DE PINCE DE FREIN

OBJECTIF : - Choisir la classe de qualité des deux vis M10x1,5 de fixation de la platine.

Données : - Facteur d'adhérence platine / porte-moyeu : $\mu_0 = 0,20$

Références : - Dossier technique
- Dossier ressource page 2

TRAVAIL DEMANDE : répondre sur copie

La pince de frein avant 1 est fixée sur le **porte-moyeu 3 ou 4** par l'intermédiaire de la **platine 8** à l'aide de deux vis M10. *Voir document technique 1.*

Pour éviter que ces deux vis ne travaillent au cisaillement, il faut que l'effort de serrage soit suffisant pour garantir une liaison complète platine/porte-moyeu **par adhérence**.

L'effort presseur d'une vis doit être suffisant pour transmettre, par adhérence, un effort tangentiel de **3600 N** aux contacts platine 8 sur porte moyeu 3-4.

- 3-1** Déterminer l'effort de traction minimal dans chaque vis nécessaire pour assurer l'adhérence platine/porte-moyeu

- 3-2** On demande une marge de sécurité de 25% sur cet effort de traction. Choisir à l'aide du tableau du dossier ressource page 2 la classe de qualité des vis à utiliser. Donner et justifier la valeur approchée du couple de serrage à appliquer lors de la pose des vis.

4^{ème} Partie : RESISTANCE DU MOYEU-DISQUE

- OBJECTIFS :**
- 4-1** - Analyser les sollicitations subies par le moyeu-disque en phase motrice.
 - 4-2** - Déterminer les sollicitations dans le moyeu-disque en phase de freinage. Analyser l'influence du serrage axial du bout d'arbre de transmission. Proposer des modifications visant à améliorer la sécurité.

Lors d'essais en conditions extrêmes sur des pièces de présérie, le constructeur a pu observer des ruptures du **moyeu-disque 2** (cf. *document technique 1*). La résistance de cette pièce est fondamentale pour la sécurité des utilisateurs du véhicule. L'analyse du problème sera menée sur le moyeu-disque de l'essieu avant droit, dans les deux conditions d'utilisation qui semblent être les plus pénalisantes :

- **phase motrice** (démarrage du véhicule) où l'arbre de transmission exerce un moment de torsion important sur la partie centrale du moyeu.
- **phase de freinage** en virage, où les efforts de guidage de la roue sont les plus élevés.

4-1 Résistance du moyeu-disque en phase motrice**Conditions de l'étude :**

Le véhicule, en charge maximale, est en phase de démarrage, moteur plein gaz.

Le moment moteur exercé par l'arbre de transmission sur le moyeu de roue est alors maximal.

Données : - Torseur représentant les actions mécaniques exercées par la roue sur le

$$\text{moyeu : } \quad \{\mathcal{J}_{(roue \rightarrow moyeu)}\}_O = \begin{Bmatrix} 0 & 205 \\ 854 & -31,5 \\ 1500 & 18 \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad \text{en N et N.m}$$

Le point O, centre de la face de fixation de la roue sur le moyeu, ainsi que la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ sont définis sur le **document technique 1** et le **document réponse 5**.

- Moment exercé par la transmission sur le moyeu : $M = 205 \text{ N.m}$
- Matériau : fonte à graphite sphéroïdal EN-GJS-350-22 (selon NF EN 1560)
 - limite élastique conventionnelle : $Re_{0.002} = 220 \text{ MPa}$
 - limite de rupture : $R = 350 \text{ MPa}$
 - limite de fatigue : $\sigma_D = 185 \text{ à } 200 \text{ MPa}$

Références : - Document technique 1

- Document réponse 5

TRAVAIL DEMANDE : répondre sur copie

L'étude porte sur la section droite S_1 située à 17 mm du point O, et assimilée à une section tubulaire de diamètre extérieur $D=30\text{mm}$, et intérieur $d=20\text{mm}$. Voir **document réponse 5**.

- 4-1-1** Pour cette partie de la pièce, on utilise le modèle « Poutre ». Cette modélisation vous paraît-elle adaptée ? Quelles réserves peut-on formuler ?
- 4-1-2** Déterminer les composantes du torseur de cohésion dans la section S_1 .
- 4-1-3** Représenter sur le **document réponse 5**, figure 1, la répartition des contraintes engendrées par le moment de torsion Mt . Sur feuille de copie, calculer la valeur maximale de la contrainte correspondante.

- 4-1-4** Déterminer le moment de flexion \vec{M}_f dans la section S_1 , et représenter ce vecteur et ses composantes sur la *figure 2* du **document réponse 5**. Tracer la répartition des contraintes engendrées par \vec{M}_f en complétant la *figure 2* par une vue projetée. Sur feuille de copie, calculer la valeur maximale de la contrainte correspondante.
- 4-1-5** Sur feuille de copie, déterminer à l'aide du critère de votre choix (Tresca, Von Mises ou autre) si ces contraintes sont acceptables ? Vous pourrez tracer le cercle de Mohr au point le plus chargé de la section S_1 , ou utiliser la formule de la contrainte équivalente.

4-2 Résistance du moyeu-disque en phase de freinage

Conditions de l'étude :

Le véhicule, en charge maximale, est en phase de freinage, lors d'un virage à gauche. Les contraintes sont calculées dans le moyeu de roue le plus sollicité (moyeu avant droit). L'arbre de transmission n'exerce pas de moment sur le moyeu de roue.

Données : - Torseur représentant les actions mécaniques exercées par la roue sur le

$$\text{moyeu : } \quad \left\{ \mathcal{J}(\text{roue} \rightarrow \text{moyeu}) \right\}_O = \begin{Bmatrix} -1414 & -339 \\ -1414 & 363 \\ 2000 & 17 \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad \text{en N et N.m}$$

Le point O , centre de la face de fixation de la roue sur le moyeu, ainsi que la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ sont définis sur la **page 3** du **dossier ressource**

- Effort axial exercé par l'écrou M16x1,5 de fixation d'arbre sur le moyeu :
Cas n°1 : 50 kN ; Cas n°2 : 25 kN
- Matériau : fonte à graphite sphéroïdal EN-GJS-350-22 (selon NF EN 1560)
limite élastique conventionnelle : $Re_{0.002} = 220 \text{ MPa}$
limite de rupture : $R = 350 \text{ MPa}$
limite de fatigue : $\sigma_D = 185 \text{ à } 200 \text{ MPa}$

Modélisation :

- Le problème a été traité à l'aide d'un logiciel utilisant la méthode des éléments finis. La **page 3** du **dossier ressource** montre, en demi coupe, le modèle utilisé :
 - Modélisation spatiale du moyeu et des pièces voisines
 - Appuis du moyeu sur les pièces voisines modélisés par des contacts surfaciques
 - Porte-moyeu fixe, et supposé indéformable
 - Actions de la roue sur le moyeu réparties sur les zones de contact roue/moyeu et goujons/moyeu
 - Serrage axial du bout d'arbre de transmission modélisé par des actions surfaciques
 - Les calculs ont été menés pour deux cas de charges. La modélisation est identique, excepté l'effort axial de serrage du bout d'arbre de transmission :
 - Cas n°1 → serrage élevé de l'écrou M16x1,5 de fixation de l'arbre de transmission
 - Cas n°2 → serrage modéré de l'écrou de fixation de l'arbre de transmission
- La répartition de la contrainte équivalente de Von Mises, dans la section plane verticale, est représentée sur la **page 3** du **dossier ressource**.

Références : - Dossier ressource page 3 (résultats du calcul)
- Document technique 1
- **Document réponse 6**

TRAVAIL DEMANDE :

- 4-2-1** Préciser la zone à risque en l'entourant sur la *figure 1* du **document réponse 6**.
Au vue de la nature statique et dynamique des sollicitations, localiser, par une flèche, le point qui vous paraît le plus critique (risque de rupture).
Argumenter votre réponse en précisant pourquoi cette zone est critique, et quels sont les risques.
Relever la valeur de la contrainte en ce point, pour les deux cas de charge.
- 4-2-2** Proposer une modification du montage permettant de réduire l'influence du serrage axial de l'arbre de transmission sur le niveau de contraintes dans le moyeu. Représenter les modifications sous forme d'un croquis commenté, en complétant la *figure 2* du **document réponse 6**.

DOSSIER RESSOURCE

Ce dossier comporte les documents suivants :

- Couples de serrage et efforts de traction recommandés pour boulons normalisés profil I.S.O. page 2
- Résultat du calcul par éléments finis page 3

Sous – épreuve U 41

**Couples de serrage et efforts de traction recommandés
pour boulons normalisés profil I.S.O.**

Les couples de serrage ont été déterminés au 4/5 de la limite élastique minimum des différentes classes de matière utilisée dans la boulonnerie.

Ces couples tiennent compte d'un coefficient de frottement de 0.13 correspondant à des boulons montés, graissés normalement : le filetage et les faces en frottement doivent être de fabrication soignée.

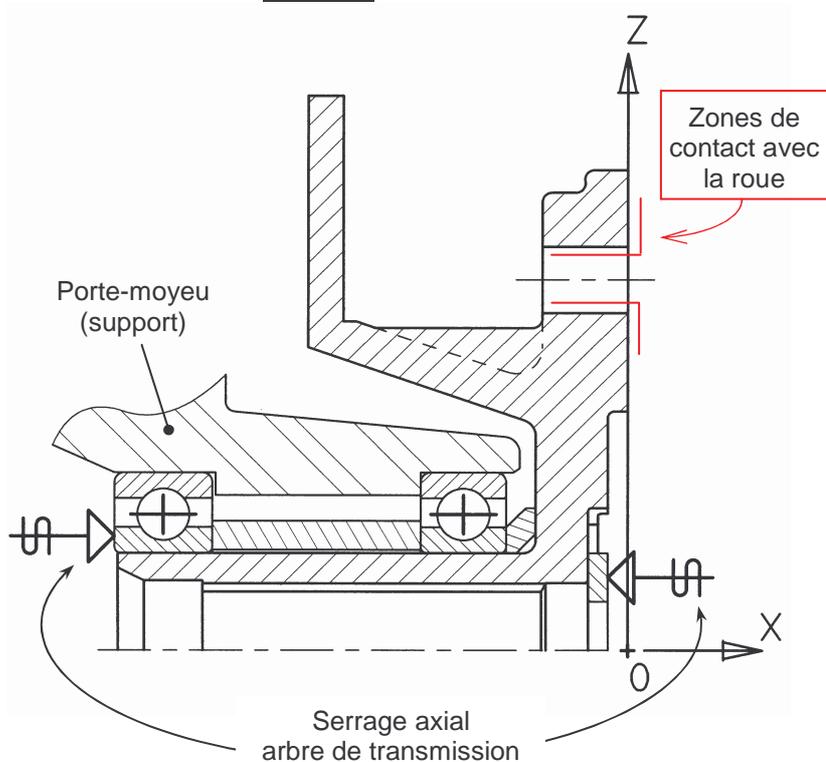
Une rondelle plate suivant norme R.933.10 doit être mise sous la tête de la vis ou sous l'écrou, suivant qu'il s'agit d'un boulon ou d'un goujon.

Classe de qualité

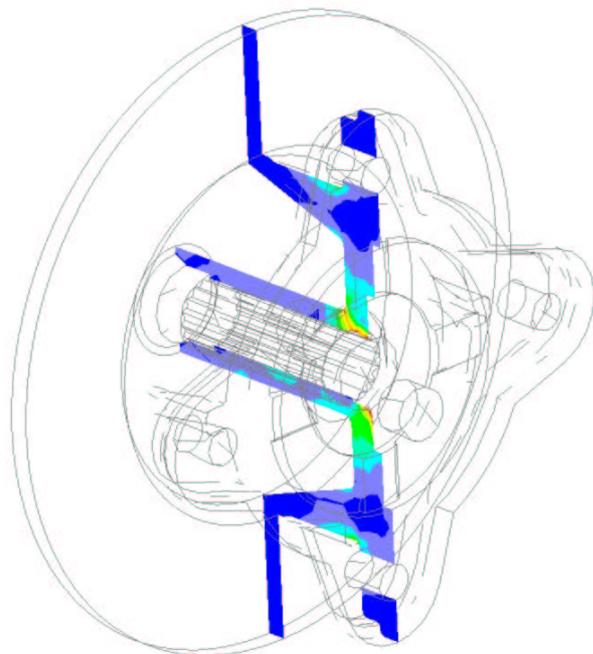
dimensions des boulons			4-6		6-6		8-8		10-9		12-9	
Profil I.S.O			Couple de serrage daN.m	Effort de traction sur la vis (daN)	Couple de serrage daN.m	Effort de traction sur la vis (daN)	Couple de serrage daN.m	Effort de traction sur la vis (daN)	Couple de serrage daN.m	Effort de traction sur la vis (daN)	Couple de serrage daN.m	Effort de traction sur la vis (daN)
ø du boulon	Pas	Cote sur plat										
1,6	0,35	3,2	0,007	20,5	0,009	26	0,017	52	0,020	60	0,024	69
2	0,4	4	0,014	33	0,018	42	0,035	85	0,041	99	0,047	113
2,5	0,45	5	0,029	45	0,036	57	0,072	112	0,085	132	0,097	150
3	0,50	5,5	0,050	86	0,062	107	0,120	215	0,140	245	0,170	287
3,5	0,60	6	0,075	115	0,095	145	0,180	280	0,210	325	0,250	383
4	0,7	7	0,110	148	0,140	185	0,270	370	0,310	418	0,370	494
5	0,8	8	0,200	230	0,250	290	0,500	575	0,570	650	0,670	768
6	1	10	0,370	344	0,460	430	0,900	860	1,050	973	1,250	1 145
7	1	11	0,610	500	0,760	625	1,500	1 250	1,700	1 410	2,000	1 670
8	1,25	13	0,900	635	1,900	795	2,200	1 590	2,500	1 800	3	2 120
10	1,50	17	1,800	1 000	2,200	1 250	4,500	2 500	5,100	2 830	6	3 340
12	1,75	19	3	1 450	3,7	1 810	7,5	3 620	8,5	4 100	10	4 850
14	2	22	4,900	2 020	6,1	2 520	12,2	5 050	14	5 720	16,5	6 750
16	2	24	7,500	2 750	9,4	3 440	18,5	6 880	21	7 800	25	9 170
18	2,5	27	10,4	3 350	13	4 200	26	8 350	29,5	9 480	35	11 200
20	2,5	30	14,8	4 300	18,5	5 350	37	10 750	42	12 150	49,5	14 380
22	2,5	32	20	5 400	25	6 750	50	13 500	56,5	15 250	67	18 000
24	3	36	25,5	6 200	32	7 750	64	15 500	72	17 500	85	20 600
27	3	41	37	8 150	46	10 200	92	20 350	105	23 000	124	27 200
30	3,5	46	51	9 950	64	12 450	127	24 900	144	28 150	170	33 200
33	3,5	50	68	12 300	85	15 400	170	30 700	194	34 800	215	41 000
36	4	54	88	14 500	110	18 100	220	36 200	250	41 000	295	48 200
39	4	58	113	17 500	141	21 900	282	43 700	320	49 500	375	58 200
42	4,5	63	141	20 000	176	25 000	352	50 000	400	56 600	470	67 000
45	4,5	67	176	23 500	220	29 400	440	58 700	500	66 500	590	78 500

RESULTAT DU CALCUL PAR ELEMENTS FINIS

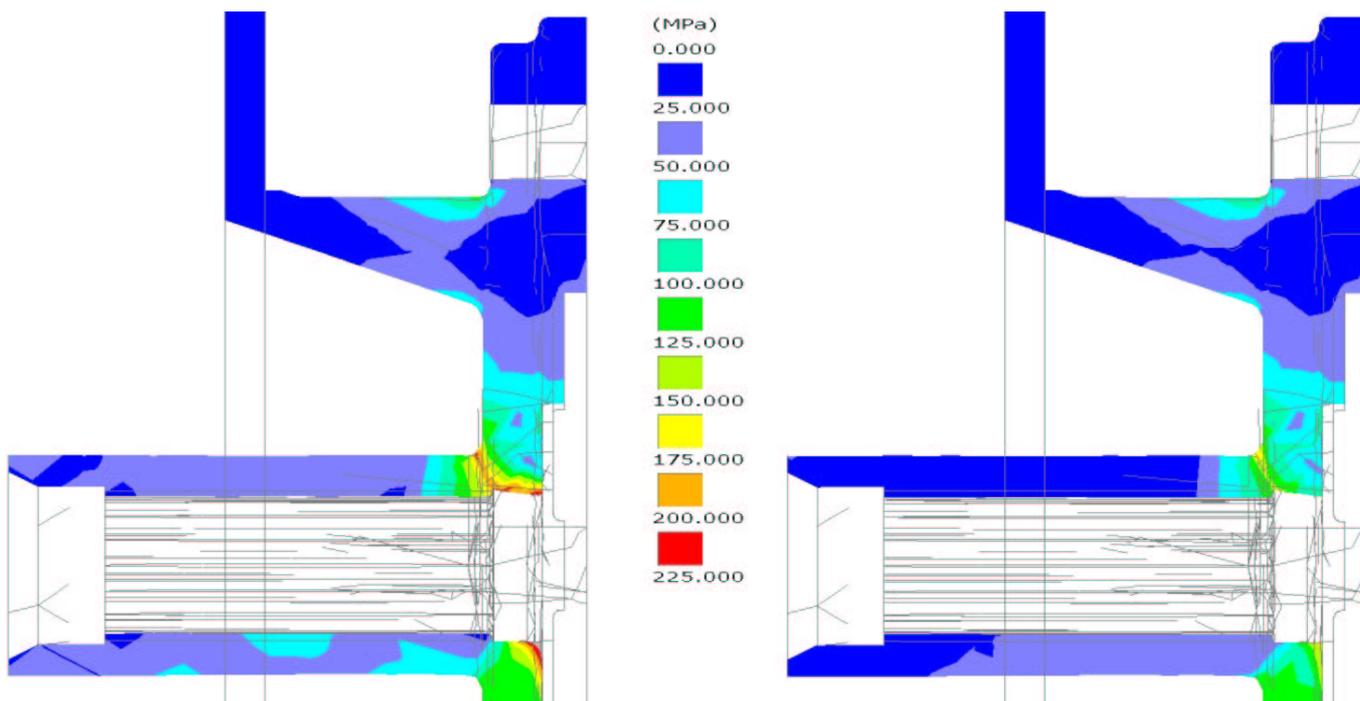
Modèle



Position de la section étudiée



Contrainte équivalente de Von Mises dans la section médiane verticale



Cas n°1

Serrage axial : 50 kN

Cas n°2

Serrage axial : 25 kN

DOSSIER REPONSE

Ce dossier comporte les documents réponse suivants, **à rendre avec la copie** :

Document réponse 1 :

Schéma cinématique du demi-train avant

Document réponse 2 :

Couple de freinage

Document réponse 3 :

Répartition du freinage

Document réponse 4 :

Effort sur la pédale

Document réponse 5 :

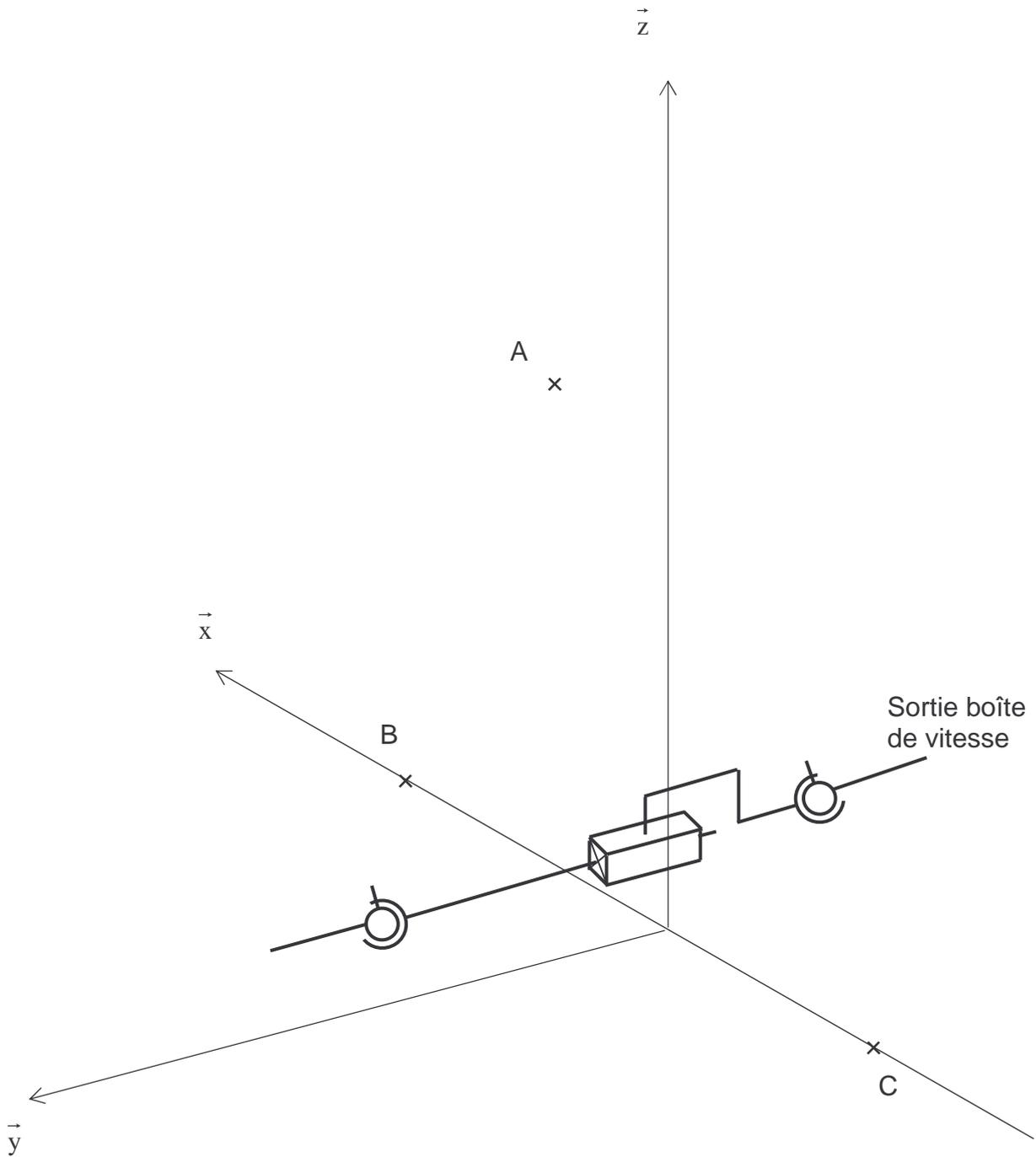
Résistance du moyeu-disque en phase motrice

Document réponse 6 :

Résistance du moyeu disque en phase de freinage

Sous – épreuve U 41

1- Réaliser le schéma cinématique du demi-train avant équipé de son arbre de transmission.

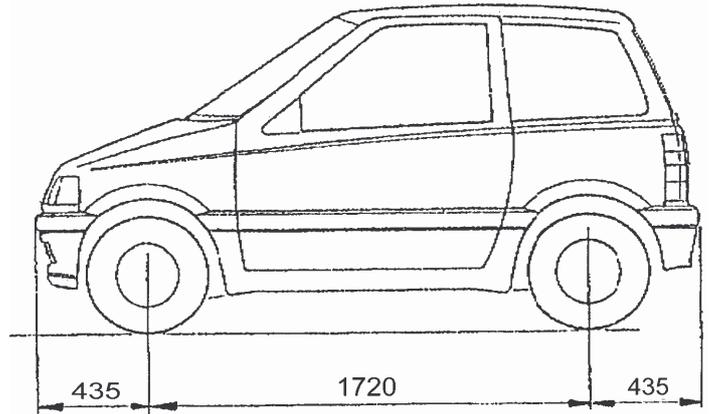
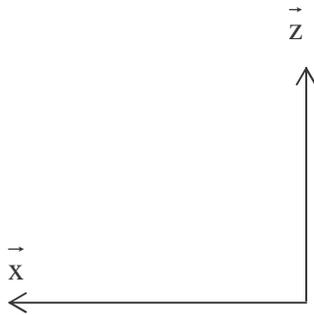


A est le centre de la liaison entre la jambe d'amortisseur et la patte de fixation sur la structure du véhicule.

B et C sont les centres des articulations élastiques entre le bras inférieur et le châssis.

Zone d'agrafage

*Document à placer et à agraffer
à l'intérieur d'une copie (dans le coin bas gauche)*



Théorème de l'énergie cinétique :

$$E_C(S/Rg)_{t_2} - E_C(S/Rg)_{t_1} = W_{t_1}^{t_2}(\bar{S} \rightarrow S/Rg) + \sum W_{t_1}^{t_2}(S_i \leftrightarrow S_j)$$

La variation de l'énergie cinétique est égale au travail des forces extérieures et intérieures.

Avec t_1 : début du freinage t_2 : fin du freinage

hypothèses à poser et justifications

Variation de l'énergie cinétique :

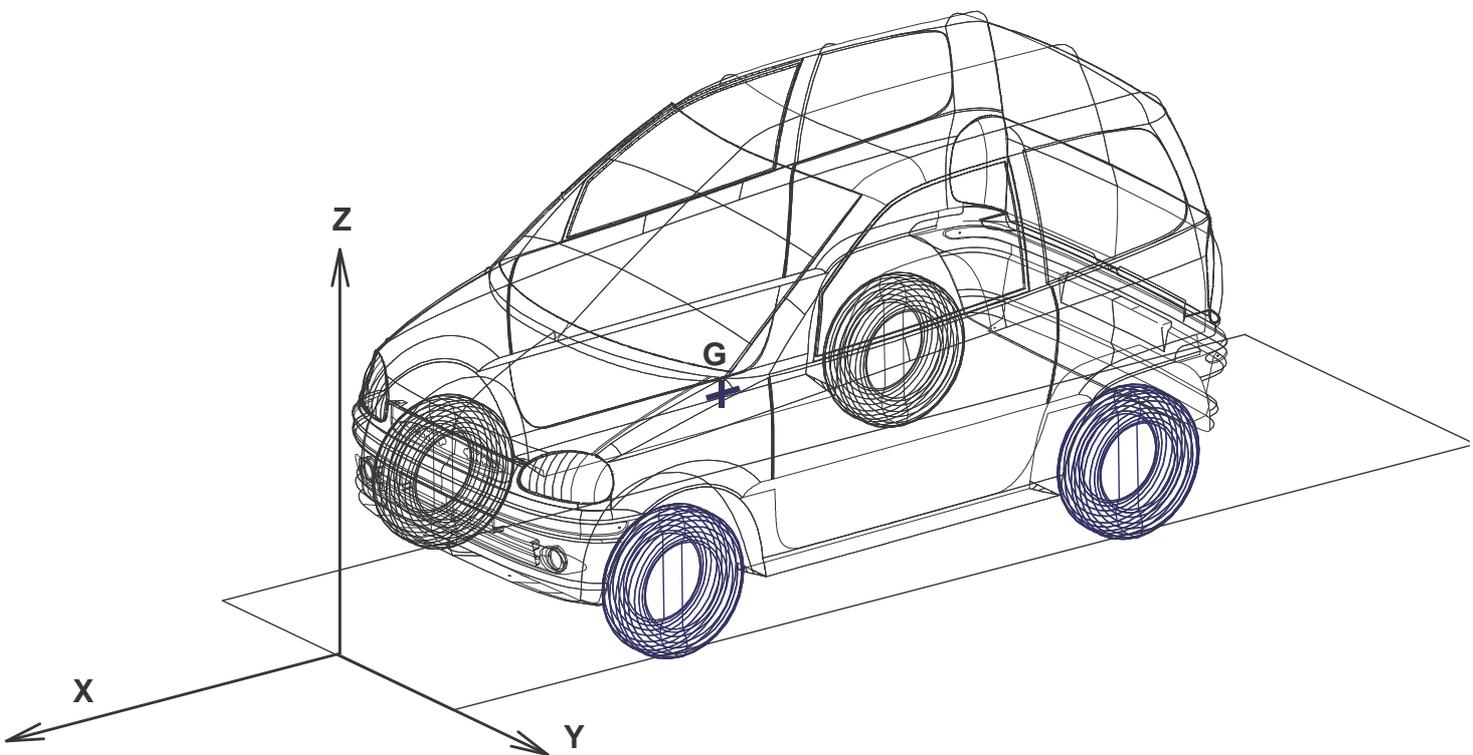
Travail des forces extérieures :

Travail des actions mutuelles internes :

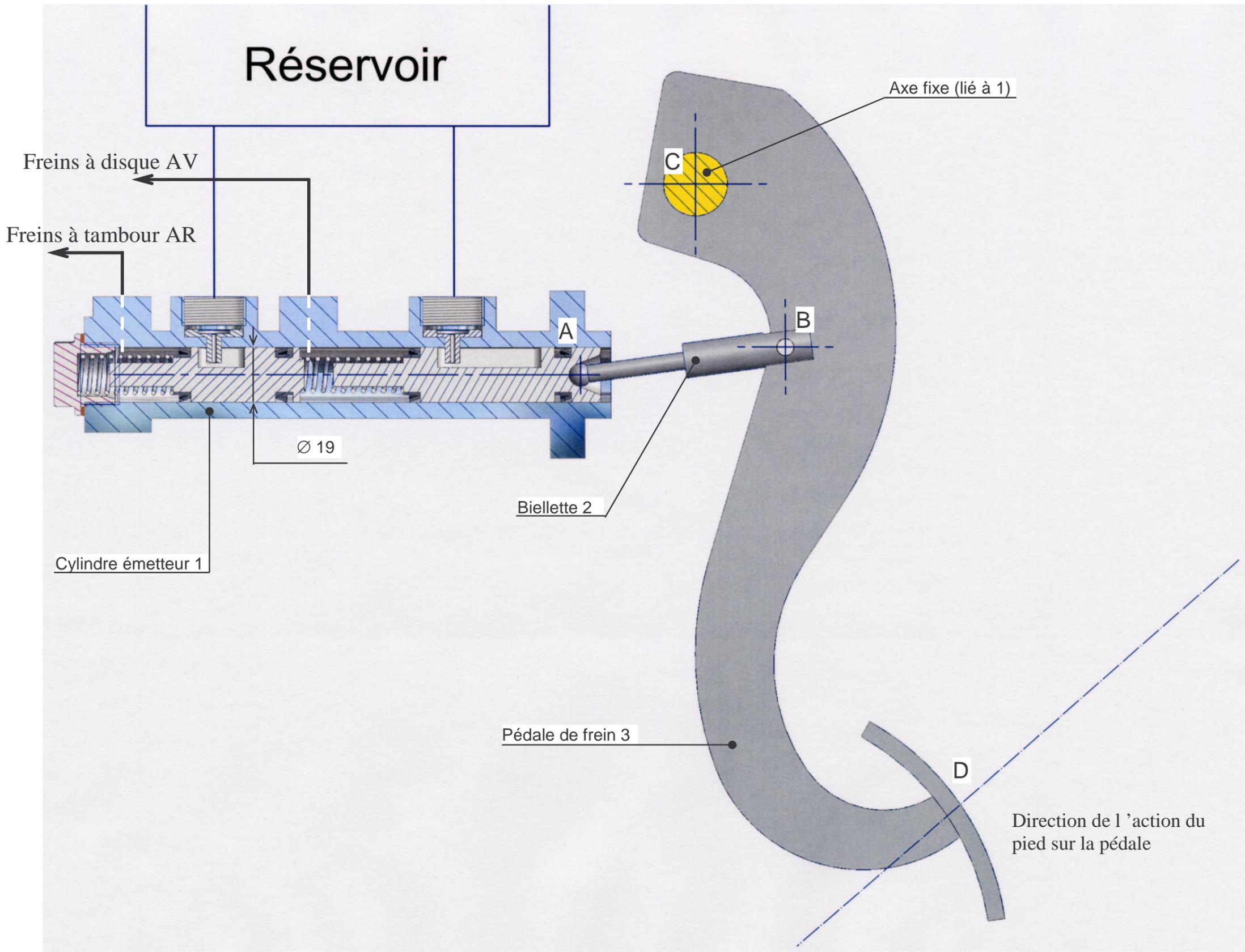
Application numérique :

2-1-2-1 Ecrire le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble "VIRGO".

2-1-2-2



2-1-2-3 En déduire en % la répartition du freinage sur les roues avant et les roues arrières.



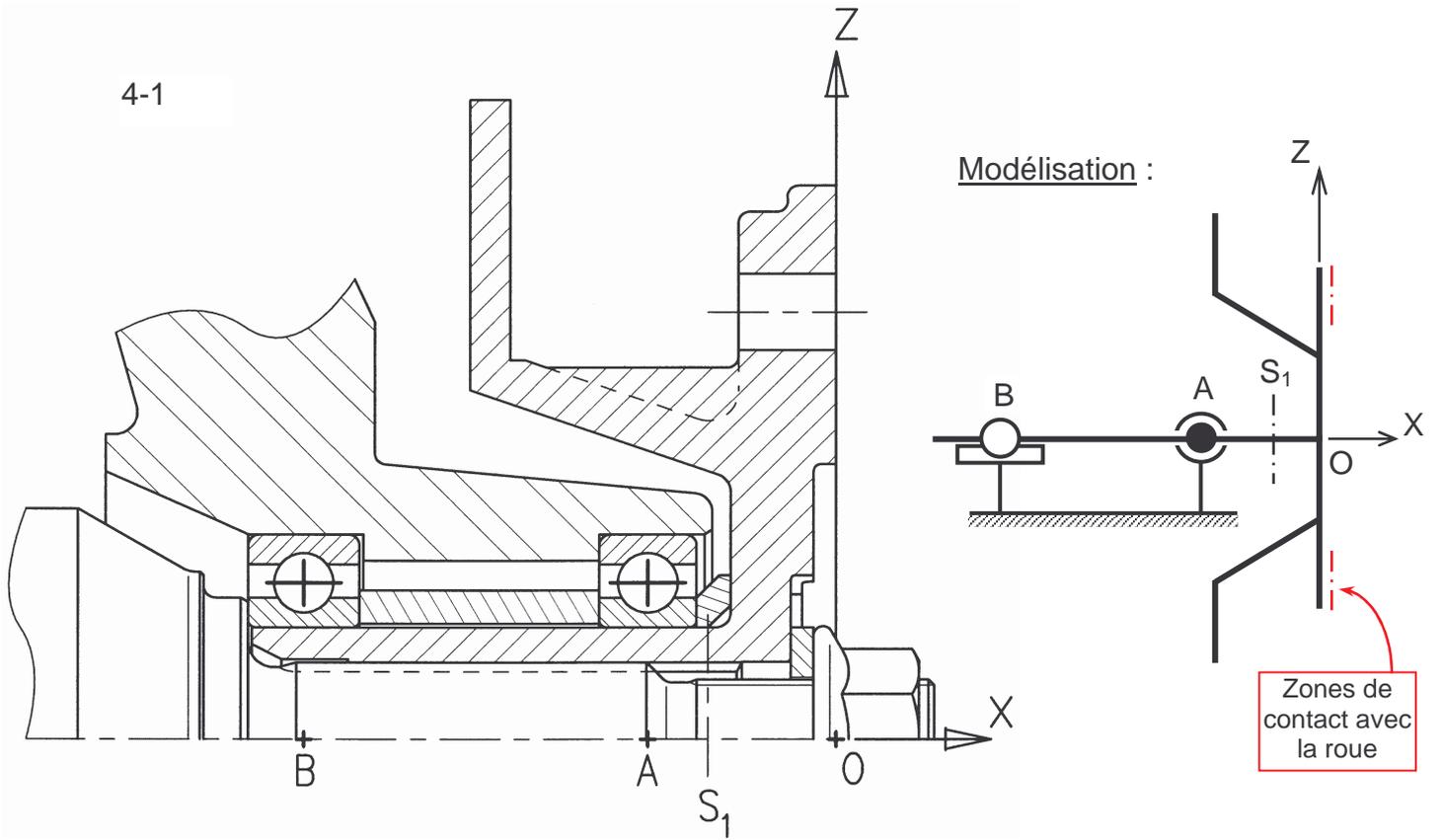


Figure 2

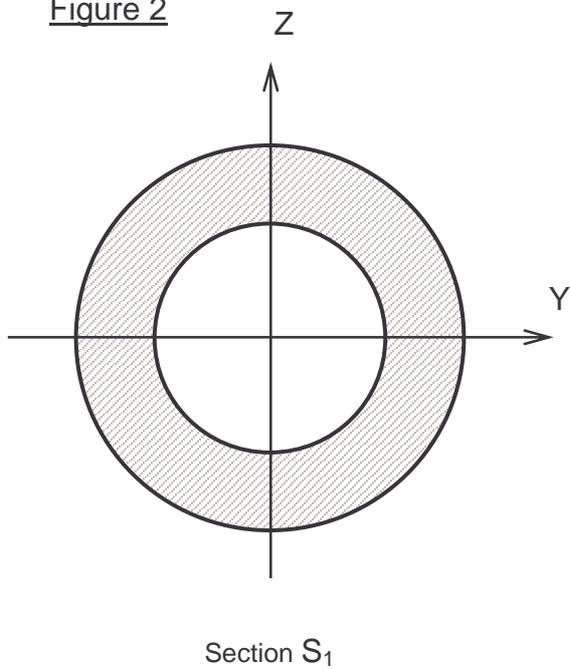
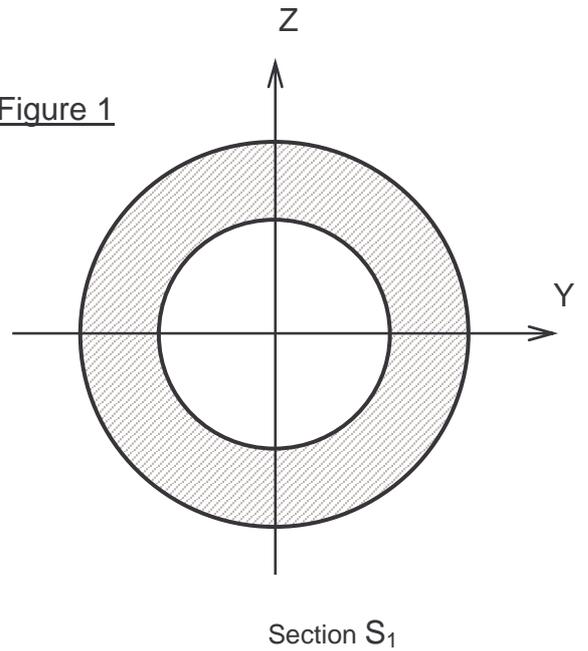


Figure 1



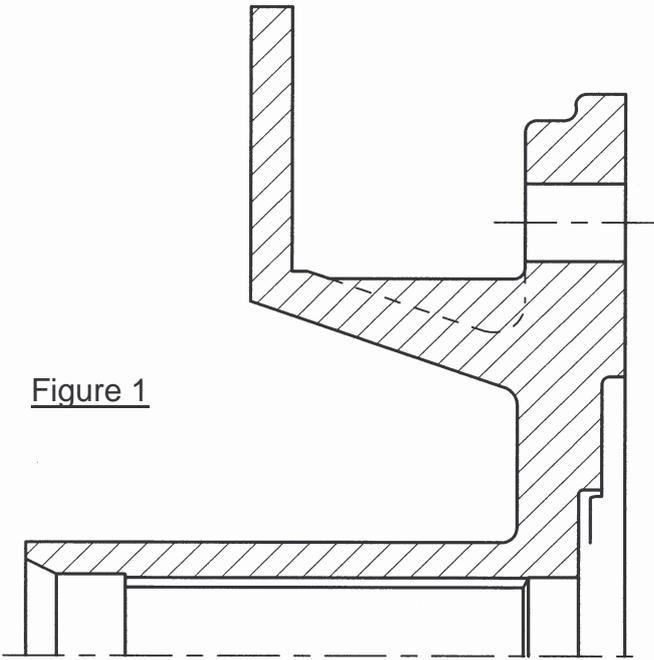
Zone d'agrafage

*Document à placer et àagrafer
à l'intérieur d'une copie (dans le coin bas gauche)*

4-2-1

Argumentation :

Figure 1



Valeur maximale de la
contrainte équivalente

Cas n°1 :

Cas n°2 :

4-2-2

Commentaires :

Figure 2

